

補助事業番号 2021M-125

補助事業名 2021年度 層状物質内不整合界面層生成による内部超潤滑の発現機構解明  
補助事業

補助事業者名 法政大学 理工学部機械工学科 平野 元久

## 1 研究の概要

摩擦は日常いたるところで遭遇する現象でありながらその本質は複雑である。粗面同士の摩擦ではマクロ形状の凹凸の変形が重要となるのに対し、清浄平坦な表面同士では原子間力の作用が効くようになり、両面の格子定数が無理数比のとき摩擦が実効的に消失する超潤滑が実現される。超潤滑は原子・分子スケールの限られたマイクロ系でのみ実現されているが、マイクロ系超潤滑の原理をマクロ系界面で実現する応用研究は産業上極めて重要である。

本研究では、マイクロ系での超潤滑発現第一原理を実用部品の大面積のマクロ系に応用展開する際に壁となっている技術的困難を解消し、軸受をはじめとするマクロスケールの実用部品の超潤滑発現を実現するために、グラファイト・遷移金属カルコゲナイド等層状物質内に生成される超潤滑極薄界面層を層状物質内部に生成する材料組織制御法を開発する。

## 2 研究の目的と背景

摩擦消失現象の超潤滑(図1)の実現は、人類発展の基幹を担ってきた機械工学の長年の夢である。超潤滑が夢にとどまらず研究課題として登場したのは、数百年におよぶ摩擦研究の歴史の中では最近のことといえる。1990年に申請者の平野らは、原子論の立場から摩擦を調べ、接触面が互いにすべるとき原子に作用する力が互いに打ち消し合って摩擦が消失する現象が現実系で起こることを理論的に証明した(M. Hirano & K. Shinjo PRB 1990)。この超潤滑理論の提唱が源流となりさまざまな

材料系のナノ構造で超潤滑が観測された。本申請ではグラフェン・カルコゲナイド層状物質内部での界面のすべり機能と材料の強加工せん断変形による層状物質内部での不整合界面人工制御に着想を得た研究構想を提案する。本研究の目的は「物質内不整合界面制御による層状物質内部での超潤滑発現機構の解明」と「超潤滑材料開発に向けた層状物質内部での不整合界面生成条件の解明」である。

## 3 研究内容

### (1) 層状物質内不整合界面層生成による内部超潤滑の発現機構解明

<http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/2021%E5%B9%B4%E5%BA%A6JKA%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%88%90%E6%9E%9C.pdf>

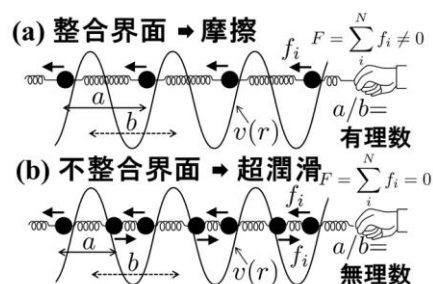


図 1(a)摩擦発生( $a/b = \text{有理数}$ )と(b)摩擦消失の超潤滑( $a/b = \text{無理数}$ ).  $v(r)$ は上の原子鎖のポテンシャルエネルギー.  $F$ は原子鎖が受ける摩擦力.

① 二硫化モリブデン (MoS<sub>2</sub>) と二硫化タングステン (WS<sub>2</sub>) の粉末結晶の結晶性について、粉末携帯観察から5ミクロン程度の六角形状の粉末が単結晶であろうという仮説のもとに、走査電子顕微鏡観察 (SEM: Scanning Electron Microscope) と電子線後方散乱回折 (EBSD: Electron Back Scattered Diffraction Pattern) を用いて、調べた。その結果、予測どおりにそれらは単結晶であることが判明した(図2)。これにより、結晶性をそろえた薄膜化実現に期待できる成果を得たと考える。今後、特許出願をめざして、実施例となる実験を進める。

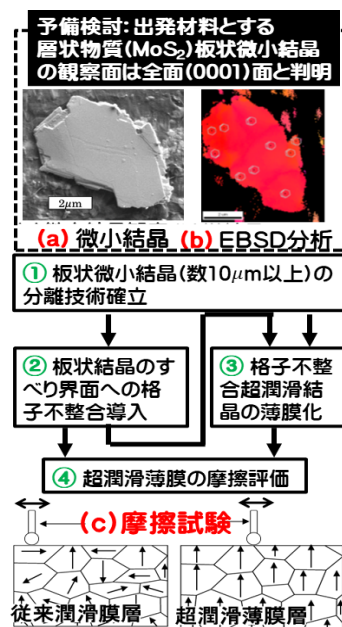


図2 成膜方法と摩擦実験

② 内部超超潤滑の効果を実証するために、マイクロメートルスケールの押し込み試験・摩擦試験を潤滑剤粉末材料について弾性係数、摩擦係数を測定した。今後、格子不整合の効果をいろいろな加工条件で調べる。

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

清浄結晶表面の摩擦の原子論から始まった超潤滑研究はその応用対象を広げ、微小機械・ナノマシンの範疇を超えて自動車エンジン等のマクロスケールの実用機械も対象としている(ジャン・ミシェル・マルタン, アリ・エルデミア, 平野元久 訳, 超潤滑: 摩擦の消失, パリティ第34巻第1号, 83-91 (2019)). 本研究課題提案先の研究領域の達成目標にも唱えられているように、力学物性の基礎を固め、現象論を超えて論理的な研究戦略に沿って新しい材料機能の創成に取り組む研究姿勢が重要となる。世界情勢を鑑みると、日本の機械工学にとっても多品種・高付加価値製品の生産技術の強化が国力強化にとって急務となっている。本研究領域が掲げる達成目標は、これからの工業製品の価値創造の基礎技術になると理解している。本提案課題の研究代表者として、研究期間後半においては企業と連携して潤滑材料設計指針の産業適用性検証の対象となれるような研究推進を図りたいと考えている。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本補助事業者 平野元久は、NTT研究所(1982-2003)において情報機器のナノトライボロジー研究に従事し、世界に先駆けて原子的清浄表面の摩擦発生の原子論的機構を理論的に解明した[M. Hirano and K. Shinjo, Atomistic locking and friction, Phys. Rev. B41, 11837-11851 (1990)]. さらに、金属・半導体などの現実系で超潤滑: 摩擦消失状態の存在を理論的に導き、超潤滑を新しい概念として提唱した[M. Hirano, Atomistics of superlubricity, Friction, 2 (2), 95-105 (2014)]. 実

験では超潤滑理論の摩擦異方性の理論予測を実証した[M. Hirano, K. Shinjo, R. Kaneko, and Y. Murata, Observation of superlubricity by scanning tunneling microscopy, Phys. Rev. Lett. 78, 8, 1448-1451 (1997)]. これらの成果を著書[M. Hirano, Friction at the Atomic Level: Atomistic Approaches in Tribology, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2018.]としてまとめた. このように, 超潤滑研究の開拓・発展に大きく貢献し超潤滑研究のパイオニアと目されている.

これまでに, 超潤滑は限られた微視的な系で観測されてきたが, 巨視的スケールのマクロ界面の原子配列制御の困難の壁によって, 超潤滑の社会実装の実現が阻まれてきた. 地球規模の産業振興と環境保全の両立にとって, この困難の克服の挑戦は重要課題となっている. 本研究補助事業では, 格子不整合界面を層状物質材料内部に組込む内部超潤滑の新概念・新機能を実現し, 極小摩擦係数  $\mu \sim 0.0001$  の超潤滑材料を開発することを目的とし, 層状物質材料内部のすべり面に強せん断加工等を用いて格子不整合を導入する潤滑性微小結晶の材料組織制御機構の解明をはかった. これにより, ナノ超潤滑の機構をマクロ界面に組込む新しい超潤滑材料開発への応用展開を目指す.

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. 久保田優作・平野元久, 超潤滑の動力学的安定性, 日本機械学会2021年度年次大会(2021 9.5-8, 2021, 千葉大学) 口頭発表(一般) S113-19.

## 7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

JKA報告(2021M-125).pdf

(<http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/2021%E5%B9%B4%E5%BA%A6JKA%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%88%90%E6%9E%9C.pdf>)

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 法政大学理工学部(ホウセイダイガク リコウガクブ)

住 所: 〒184-0002

東京都小金井市梶野町3-7-2

担 当 者: 教授 平野 元久 (キョウジュ ヒラノ モトヒサ)

担 当 部 署: 機械工学科(キカイコウガクカ)

E - m a i l: kkenkaia@hosei.ac.jp

U R L: [http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/index\\_j.html](http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/index_j.html)